

# LOS YACIMIENTOS DE ARCILLAS DE LA ISLA DE BOKO. CARACTERIZACIÓN Y APLICACIONES TECNOLÓGICAS.

Área temática C (Aplicaciones de los áridos. Calidad de producción y de producto).

Jorge Luis Costafreda Mustelier<sup>1</sup>; Carlos Leyva Rodríguez<sup>2</sup>; José Luis Parra y Alfaro<sup>1</sup> y Mateo Ndong Bacale<sup>3</sup>

1 Doctor Ingeniero Geólogo. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (+34 913367025) (costafreda@yahoo.es).

2 Doctor Ingeniero Geólogo. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa. Las Coloradas. Provincia Holguín. Cuba ([carlosalberto582000@yahoo.es](mailto:carlosalberto582000@yahoo.es)).

1 Doctor Ingeniero de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (+34 913367069) (joseluis.parra@upm.es).

1 Ingeniero Técnico de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (+34 913367025) (mateondong@hotmail.com).

## RESUMEN

Las recientes investigaciones realizadas en los potentes yacimientos de arcillas que se encuentran en la Ciudad de Malabo (*Bioko Norte*), República de Guinea Ecuatorial, revelaron la presencia mayoritaria de una fase compuesta por sepiolita, acompañada por especies secundarias de feldespato, caolinita, hematita, moscovita e illita.

Los análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos x (DRX) y agregado orientado con etilenglicol (AO), indican un comportamiento similar y homogéneo de la composición de las muestras estudiadas.

Por otro lado, los análisis químicos, puzolanicidad, granulometría (*tamizado en seco*), consistencia, tiempo de inicio y final de fraguado y la determinación de la estabilidad de volumen, confirman la idoneidad de estas arcillas sepiolíticas no expansivas para sustituir hasta un 25% del cemento portland en los proyectos de mezclas de morteros.

No se tiene noticia sobre la realización de proyectos de investigación en estas formaciones sedimentarias, por lo que se considera el primer trabajo de carácter científico que se inicia para la caracterización, sistematización y posibles aplicaciones de estas arcillas en la aún incipiente industria de la construcción ecuatoguineana.

## INTRODUCCIÓN

Los trabajos de muestreo se llevaron a cabo en los grandes afloramientos formados por deposición natural en las márgenes del río San Nicolás (*Río Matadero*), que discurre a través de la Ciudad de Malabo en dirección Norte, y desemboca al Este de la bahía que lleva el mismo nombre (ver figura 1).



Figura 1: Mapa de ubicación de los puntos de muestreo. (Fuente: [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com)).

Durante los trabajos de campo se tomaron tres muestras representativas de las paredes de los afloramientos, mediante el método de ranurado continuo (*channel sampling*) (ver figura 2).



Figura 2: Detalles de la toma de muestras en uno de los grandes afloramientos de arcillas sepiolíticas de Malabo, Guinea Ecuatorial (Fotografía: Jorge L. Costafreda, 2012).

En las campañas de reconocimiento geológico y muestreo tomaron parte especialistas y profesores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid (Universidad Politécnica de Madrid) y del Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa (ISMM), Cuba, durante el mes de marzo de 2012, con la inestimable ayuda de profesores y alumnos de la Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial (UNGE).

La realización de los análisis y ensayos tuvo lugar en el Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción (LOEMCO) y en el Laboratorio Centralizado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

La interpretación de los resultados fue realizada en su totalidad por los especialistas de la Escuela de Minas de Madrid y del Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa.

En las tablas 1 y 2 se ofrecen las coordenadas de los puntos de muestreo y los ensayos y análisis aplicados a las muestras seleccionadas.

Tabla 1: Relación de muestras analizadas y coordenadas de los lugares de muestreo.

NOMBRE DE LA MUESTRA	COORDENADAS
Arcilla - 1	N 3° 45' 07.66" E 8° 47' 18.97"
Arcilla - 2	N 3° 45' 22.31" E 8° 47' 23.38"
Arcilla - 3	N 3° 45' 14.99" E 8° 47' 15.68"

Tabla 2: Nomenclatura de ensayos realizados por laboratorios para la caracterización y aplicación de las arcillas sepiolíticas de la Isla de Bioko, Guinea Ecuatorial.

NOMBRE DE LA MUESTRA	TIPO DE ANÁLISIS / ENSAYOS	LABORATORIO
Arcilla - 1	- DRX y Agregado Orientado*	(*) Laboratorio centralizado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid (Universidad Politécnica de Madrid).
Arcilla - 2	- Microscopía Electrónica de Barrido**	
Arcilla - 3	- Granulometría de partículas**	
	- Contenido en Materia Orgánica**	(**) Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción (LOEMCO) de Madrid.
	- Ensayo de puzolanidad**	
	- Análisis químicos**	
	- Consistencia del mortero fresco/tiempo de inicio y final de fraguado, estabilidad de volumen, resistencias mecánicas**	

## CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS.

### *Caracterización por difracción de rayos x y agregados orientados.*

Dado que las muestras son visiblemente arcillosas, se analizaron directamente con el método de los agregados orientados; posteriormente, después del tratamiento con etilenglicol, se reanalizaron mediante difracción de rayos x.

#### Muestra Arcilla 1:

Los picos principales que muestra este espécimen corresponden al mineral sepiolita. Contiene otras fases subordinadas, representadas por picos débiles de hematita y trazas de caolinita (ver figura 3).

La detección de pequeños picos con valores  $d\text{\AA} = 2.5195$ ,  $1.6960$  y  $1.6755$  indica la presencia de mica biotita, moscovita-illita, plagioclasa albitizada y ortoclasa, como fases subordinadas solapadas entre sí. La moscovita-illita ( $d\text{\AA} = 2.5195$ ) se enmascara con la sepiolita.

#### Muestra Arcilla 2:

Se detectó un pico de máxima intensidad relativa (100%) en el ángulo  $2\Theta = 11.705$  y valor de espaciamento interplanar  $d\text{\AA} = 7.5543$ , que corresponde a una arcilla hidratada (sepiolita). Se detectaron, además, picos débiles de hematita y caolinita en forma de trazas (ver figura 3).

Otras especies mineralógicas detectadas en esta muestra son las que representan la paragénesis *brucita-gibbsita* ( $d\text{\AA} = 4.453$ ) y caolinita.

Se determinaron otras especies como mica biotita ( $d\text{\AA} = 1.6959$ ), plagioclasa e illita ( $d\text{\AA} = 2.5440$ ), moscovita ( $d\text{\AA} = 4.4503$  y  $2.5440$ ) y calcita ( $d\text{\AA} = 3.6666$ ).

#### Muestra Arcilla 3:

La sepiolita forma un pico de máxima intensidad relativa (100%) en el tramo de sensibilidad de las arcillas, donde el ángulo  $2\Theta = 11.635$  y  $d\text{\AA} = 7.5996$ . El valor del espaciamento interplanar indica que es una arcilla hidratada en condiciones naturales (ver figura 3).

Las fases secundarias están representadas por picos débiles de hematita ( $d\text{\AA} = 3.6643$  y  $2.5479$ ,  $2\Theta = 33.195$  y  $24.270$  e  $I/\text{Máx} = 60.24\%$  y  $48.39\%$ , respectivamente) y caolinita como trazas. Otras fases detectadas con el análisis son: plagioclasa ( $d\text{\AA} = 2.5479$  -  $1.7188$ ), brucita-gibbsita y caolinita.

La plagioclasa presenta fuertes rasgos de albitización ( $Ab = 70\%$  -  $An = 30\%$ ), indicando un posible efecto de alteración por efecto hidrotermal singenética. Este mismo proceso pudo haber provocado la formación de la caolinita a partir de los feldespatos.

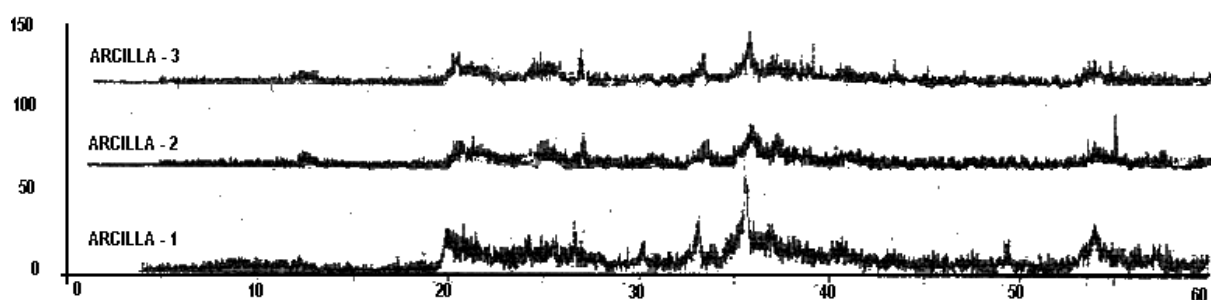


Figura 3: Derivatogramas mostrando los picos principales de la fase sepiolita y fases subordinadas en las muestras estudiadas.

### ***Caracterización por microscopía electrónica de barrido.***

Los estudios de caracterización mediante el empleo del microscopio electrónico, permitió determinar las características morfológicas de los constituyentes minerales de las muestras seleccionadas.

Con los resultados obtenidos se detectó la presencia mayoritaria de cristales de sepiolita de color blanco a gris claro, con típicos hábitos alargados y aciculares, entremezclados entre sí, que forman retículos, fibras y canales. Sin embargo, las observaciones de detalle establecieron otras tendencias de estos minerales, como la formación de masas compactas, con texturas irregulares y muy porosas.

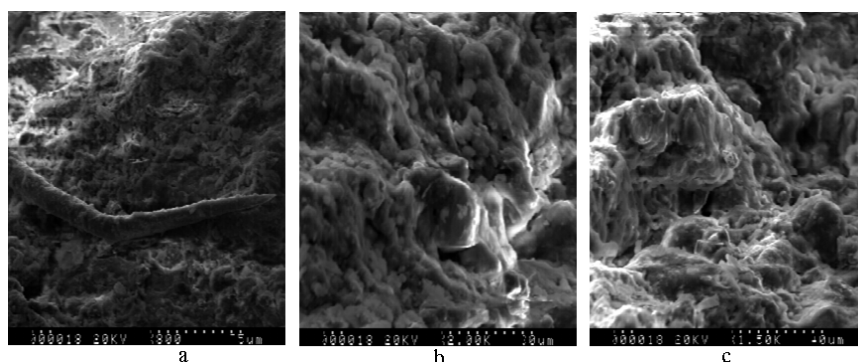


Figura 4 *a, b y c*: Microfotografías de la muestra *Arcilla – 1*. En *a*, la muestra se examinó con aumento de  $800\times - 75\mu\text{m}$ ), en *b*:  $2.000\times - 10\mu\text{m}$  y *c*:  $1.500\times - 40\mu\text{m}$ .

En la figura 4 *a* se aprecia sepiolita fibrosa de gran longitud, de hábito acicular. En *b* y *c*, con mayor aumento, se observa desarrollo masivo de sepiolita que en ocasiones forma masas porosas compactas.

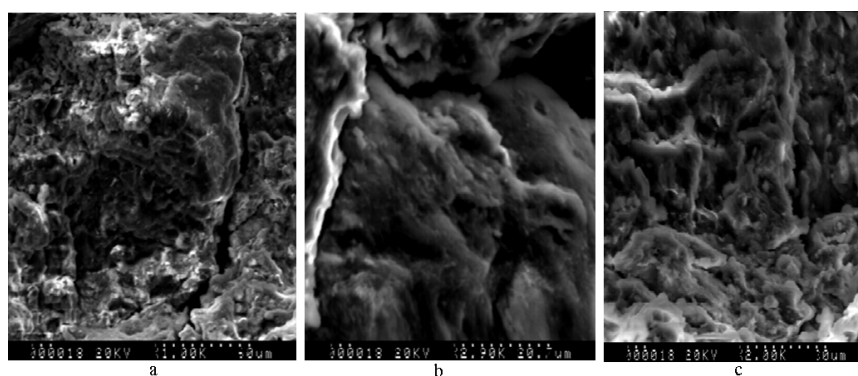


Figura 5 *a, b y c*: Microfotografías de la muestra *Arcilla – 2*. Con aumentos en *a*, *b* y *c* de  $1.000\times - 60\mu\text{m}$ ;  $2.900\times - 20,7\mu\text{m}$  y  $2.000\times - 30\mu\text{m}$ , respectivamente).

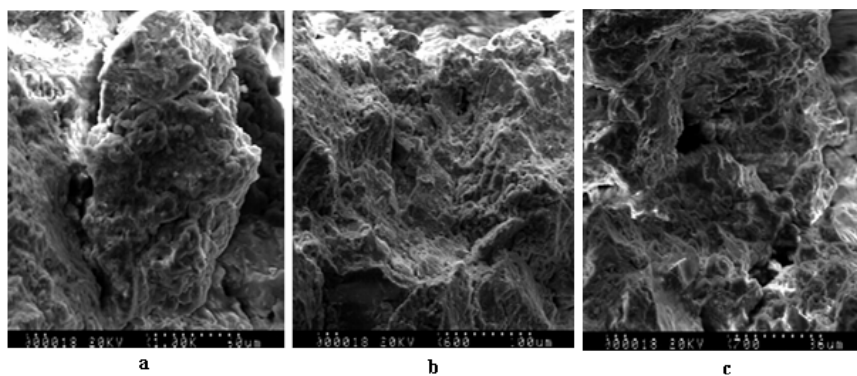


Figura 6 *a, b y c*: Microfotografías de la muestra *Arcilla-3* con aumentos en *a* de  $1.000\times - 60\text{ }\mu\text{m}$ ; *b*:  $600\times - 100\text{ }\mu\text{m}$  y *c*:  $700\times - 36\text{ }\mu\text{m}$ .

La figura 5 (*a, b y c*) muestra con claridad el desarrollo de cristales de sepiolita en forma de masas irregulares compactas y fibrosas.

En la figura 6 (*a, b y c*) se observa nuevamente la tendencia de la sepiolita a formar cúmulos compactos fibrosos e irregulares.

#### ***Caracterización por análisis químicos.***

Los resultados de los análisis químicos demostraron que la composición de las tres muestras de arcilla (*Arcilla-1*, *Arcilla-2* y *Arcilla-3*) es muy parecida. La comparación entre los porcentajes de la  $\text{SiO}_2$  total y la  $\text{SiO}_2$  reactiva, indica que tan sólo un pequeño porcentaje del dióxido de silicio (0,84% -*Arcilla-1*-; 0,89% -*Arcilla-2*- y 0,98% -*Arcilla-3*-) se comporta como residuo insoluble, por lo que prácticamente toda la sílice es reactiva, factor que les aporta propiedades puzolánicas adecuadas (ver tabla 3). Al mismo tiempo, el contenido calculado en  $\text{SiO}_2$  reactiva supera el 25% en las tres muestras, según las prescripciones de la norma UNE-EN 196-2:2006.

La relación  $\text{SiO}_2/(\text{CaO} + \text{MgO})$  aportó los valores que siguen: 28,7% (*Arcilla-1*), 27,14% (*Arcilla-2*) y 29,84% (*Arcilla-3*), lo que demuestra que las arcillas estudiadas (*sepiolitas*) poseen buenas cualidades para ser incorporadas como componentes beneficiosos al clinker de algunos cementos. La norma UNE-EN 196-2:2006, que rige los parámetros obligatorios a tener en cuenta a la hora de evaluar los materiales puzolánicos para su empleo conjunto con el clinker, indica un valor mínimo obligatorio del 3,5%, en relación a la masa total de la muestra que se analiza.

Los contenidos en CaO total respecto a la *cal reactiva* señalan que las proporciones de CaO no-reactiva (*Arcilla-1*= 0,09%; *Arcilla-2*= 0,1% y *Arcilla-3*= 0,11%) son insignificantes. Por su parte, los apreciables contenidos en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  indican las posibles cualidades reactivas de estas arcillas en las mezclas con cementos.



Tabla 3: Determinación de la composición química de las muestras *Arcilla-1*, *Arcilla-2* y *Arcilla-3* (UNE-EN 196-2:2006).

DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS	MUESTRAS		
	ARCILLA - 1	ARCILLA - 2	ARCILLA - 3
	(%)	(%)	(%)
SiO <sub>2</sub> TOTAL	27,55	28,30	27,73
MgO	0,72	0,81	0,69
CaO TOTAL	0,33	0,30	0,35
CaO LIBRE	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,44	28,22	27,37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,59	22,33	22,22
SiO <sub>2</sub> REACTIVA	26,71	27,41	27,75
CaO REACTIVA	0,24	0,20	0,24
R.I.	4,13	4,05	4,13
SiO <sub>2</sub> /(CaO + MgO)	28,7	27,14	29,84

El estudio para la determinación del contenido en humus (UNE-EN 1744-1:2010) confirmó la ausencia de materia orgánica en las muestras de arcillas sepiolíticas analizadas.

## APLICACIONES DE LAS ARCILLAS SEPIOLÍTICAS DE LA ISLA DE BOKO.

### *Aplicaciones como puzolanas según el ensayo químico de puzolanidad.*

El principio de este método se basa en la comparación de la cantidad de hidróxido de calcio presente en una disolución acuosa que contiene cemento hidratado, con la cantidad de hidróxido de calcio capaz de saturar un medio de la misma alcalinidad (UNE-EN 196-5:2006).

El ensayo se considera positivo si la concentración de *hidróxido de calcio* en disolución es inferior a la *concentración de saturación* (UNE-EN 196-5:2006) (Costafreda, J.L., 2008). Lo comentado se puede representar gráficamente, cuando los valores de concentración de iones *hidroxilo* y de *óxido de calcio* se sitúan por debajo de la isoterma de solubilidad a 40 °C (ver figura 7). En este caso se dice que la muestra analizada es *puzolánica* (UNE-EN 196-5:2006).

En un cemento puzolánico la *concentración de hidróxido de calcio* en disolución es siempre menor que la *concentración de saturación* (UNE-EN 196-5:2006).

Las muestras de arcillas sepiolíticas (*Arcilla-1*, *Arcilla-2* y *Arcilla-3*) manifiestan un carácter puzolánico importante (ver tablas 4, 5 y 6 y figura 7). En la composición química de estas muestras hay un porcentaje importante de sílice *reactiva* (26,71 - 27,41%) y en alúmina (22,22 - 22,59%), compuestos que por su carácter ácido aceleran los procesos de reactividad hidráulica frente al Ca(OH)<sub>2</sub>, en aquellas mezclas con alta alcalinidad.

Tabla 4: Resultados de los análisis de puzolanicidad para la muestra *Arcilla-1 (UNE-EN 196-5:2006)*.

<b>MUESTRA: ARCILLA - 1</b>			
<b>DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO</b>			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l
1	1,023	26,10	53,4
<b>DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO</b>			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l
1	0,985	10,69	6,3
<b>RESULTADOS</b>			
<b>DÍAS</b>		<b>PUZOLÁNICO</b>	
7		SÍ	

Tabla 5: Resultados de los análisis de puzolanicidad para la muestra *Arcilla-2 (UNE-EN 196-5:2006)*.

<b>MUESTRA: ARCILLA - 2</b>			
<b>DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO</b>			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l
1	1,023	26,14	54,0
<b>DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO</b>			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l
1	0,985	11,7	6,2
<b>RESULTADOS</b>			
<b>DÍAS</b>		<b>PUZOLÁNICO</b>	
7		SÍ	

Tabla 6: Resultados de los análisis de puzolanicidad para la muestra *Arcilla-3 (UNE-EN 196-5:2006)*.

<b>MUESTRA: ARCILLA - 2</b>			
<b>DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO</b>			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l
1	1,023	26,14	54,0
<b>DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO</b>			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l
1	0,985	11,7	6,2
<b>RESULTADOS</b>			
<b>DÍAS</b>		<b>PUZOLÁNICO</b>	
7		SÍ	



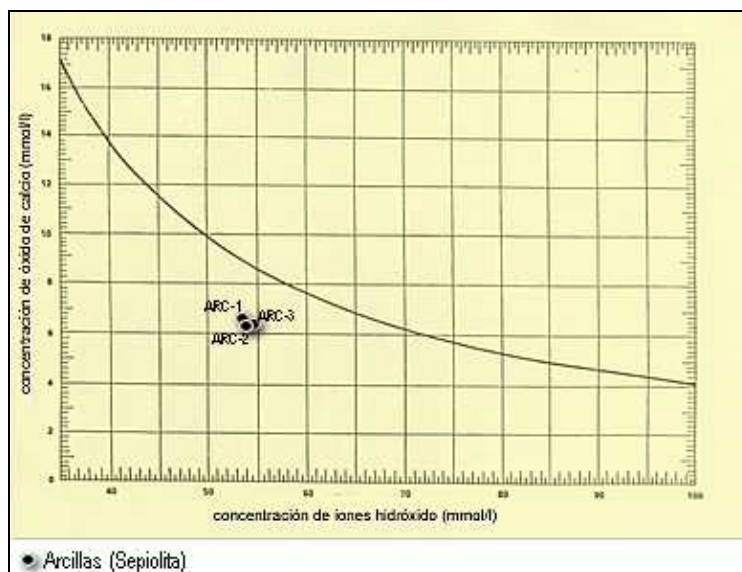


Figura 7: Representación gráfica (Fratini) de los resultados de los análisis químicos de puzolanidad para las muestras *Arcilla – 1*, *Arcilla – 2* y *Arcilla – 3* (UNE-EN 196-5:2006).

### ***Aplicaciones como puzolanas en la sustitución parcial del cemento pórtland en mezclas de morteros.***

#### *Tamizado de las muestras:*

Para orientar el estudio de las arcillas sepiolíticas de Malabo a determinadas aplicaciones prácticas, se inició su preparación y condicionamiento mediante limpieza, molienda y secado previo, seguido por un ensayo granulométrico en su modalidad de *tamizado en seco* (UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006). De este modo, se obtuvo una muestra representativa con diámetro de partículas igual a 63 micras (ver figura 8), que constituyó la base para las aplicaciones ulteriores.

Los resultados del ensayo de granulometría determinaron que los mayores porcentajes de fracciones retenidas se ubican en los *husos granulométricos* 0,50 - 0,16 - 0,80 mm, para las tres muestras analizadas. Sin embargo, la mayoría de las partículas se ha concentrado en el tamiz de 0,16 mm, lo que demuestra la fina granulometría que caracteriza a estas arcillas.

Las fracciones más gruesas se localizan en el tamiz de 2,00 mm (*Arcilla-2*), donde se retiene cerca del 8,41% de las partículas. Las muestras *Arcilla-1* y *Arcilla-3* no contienen fracciones gruesas, con la excepción de un 0,17% (*Arcilla-3*) retenido en el tamiz de 1,0 mm.

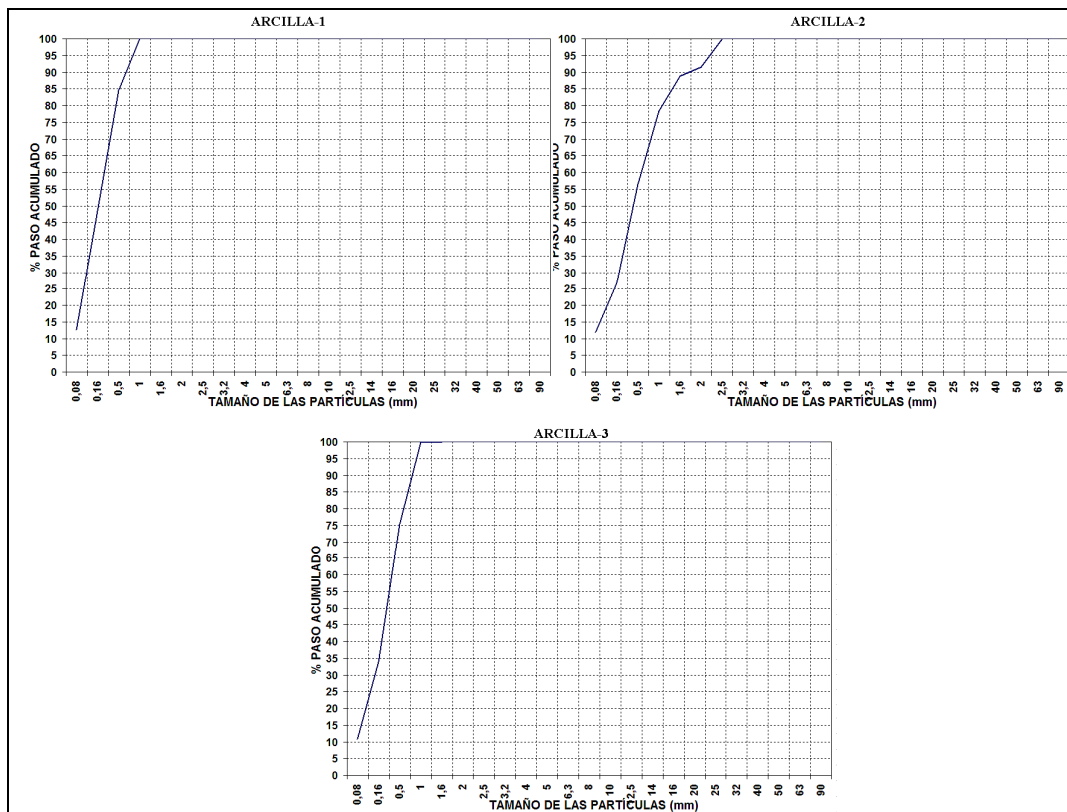


Figura 8: Distribución granulométrica de las partículas de las muestras *Arcilla-1*, *Arcilla-2* y *Arcilla-3*, obtenida mediante el método del *tamizado en seco*.

Si se toman en consideración las coordenadas de los puntos de muestreos (ver tabla 1), se comprobará que la muestra con granulometría más gruesa (*Arcilla-2*) es, precisamente, la que se encuentra más alejada del volcán *Basilé*, seguida por *Arcilla-3*; la muestra *Arcilla-1*, es la más próxima al *piamonte*, sin embargo, es la más fina.

El análisis geomorfológico del terreno donde se llevó a cabo la campaña de muestreos de esta investigación (ver figura 1), indica que, al parecer, las sepiolitas no fueron originadas por las emisiones del volcán *Basilé*, sino por pequeños estratovolcanes ubicados cerca de la línea de costa, cuyas erupciones arrojaron productos piroclásticos finos de cineritas, cenizas, lapilli, etc., que posteriormente se alteraron a sepiolitas.

Los edificios volcánicos se erigieron a poca altura, sobre un andamiaje de materiales inconsistentes e inestables que más tarde se colapsaron, originando pequeñas calderas cuyos bordes no alcanzan los 40 metros. Los derrumbes sucesivos abrieron vías que favorecieron la irrupción del mar en el interior de las calderas; de este modo, se originó la bahía de Malabo ( $N: 3^{\circ}45'40.60''$ ;  $E: 8^{\circ}46'50.45''$ ) (ver figuras 1 y 9).

De acuerdo con los razonamientos expuestos, la muestra *Arcilla-2* podría ser la categoría de sepiolita formada a partir de materiales piroclásticos gruesos que se depositaron cerca de los centros de emisión ubicados en la bahía de Malabo; mientras que las muestras *Arcilla-3* y *Arcilla-4*, respectivamente, pudieron originarse a partir de la alteración de productos volcánicos muy finos, con capacidad para viajar en suspensión, que cubrieron distancias más largas.



Figura 9: Vista parcial de la bahía de Malabo (Guinea Ecuatorial). Al fondo se aprecia parte del borde norte-noreste de la protocaldera, constituido por materiales volcanosedimentarios muy finos, dispuestos con yacencia monoclinal muy suave hacia el norte. Prácticamente, la mitad de esta caldera fue erosionada por el mar, formando una amplia ensenada en forma de *herradura*, abierta en dirección norte-noroeste (Fotografía: J.L. Costafreda, 2012).

#### Determinación de la consistencia del mortero fresco:

Una vez establecidas las poblaciones granulométricas y elegida la fracción más adecuada ( $63\ \mu$ ) para la elaboración de las mezclas de morteros, se precisó de un ensayo más: la *determinación de la consistencia del mortero fresco*. Este ensayo se llevó a cabo en un régimen de temperatura ambiental cercana a los  $19,9\ ^\circ\text{C}$ , con humedad del 76.8% y temperatura del agua de ensayo de  $18,6\ ^\circ\text{C}$ . Se empleó el método de *sacudidas*, descrito en la norma UNE-EN 1015-3.

La dosificación del mortero elaborado para este fin se ha detallado de forma pormenorizada en la tabla 7.

En todos los ensayos de consistencia la densidad aparente del mortero fresco superó los  $1200\ \text{Kg/m}^3$ , por lo que, según la norma UNE-EN 1015-3, el valor del escurrimiento corresponde a  $175 \pm 5\ \text{mm}$ , cifra que se toma como referencia a la hora de evaluar los resultados obtenidos mediante este método.

Según los resultados de la tabla 7, los morteros elaborados con arcillas sepiolíticas poseen *buena consistencia*, lo que se traduce en una buena *trabajabilidad*.

Como puede observarse, algunas dosificaciones han necesitado una cantidad adicional de agua destilada, motivado por la alta capacidad de absorción de las muestras ensayadas.

Tabla 7: Detalles sobre la dosificación de morteros para la determinación de la consistencia (UNE-EN 1015-3).

DOSIFICACIÓN DEL MORTERO		PESO DE LA ARENA (g)	DIÁMETRO DE ESCURRIMIENTO (mm)	
1	100% Cemento Pórtland + Arena Normalizada + 225 g de Agua Destilada ( <i>Muestra Patrón</i> )	1348.6	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	
4	75% Cemento Pórtland + 25% Puzolana ( <i>Arcilla 1</i> ) + Arena Normalizada + 290 g de Agua Destilada.	1350.4	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	
5	75% Cemento Pórtland + 25% Puzolana ( <i>Arcilla 2</i> ) + Arena Normalizada + 290 g de Agua Destilada.	1349.6	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	
6	75% Cemento Pórtland + 25% Puzolana ( <i>Arcilla 3</i> ) + Arena Normalizada + 290 g de Agua Destilada.	1350.4	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	

#### Determinación de las resistencias mecánicas:

Los más altos valores de resistencias mecánicas, según la tabla 8 y la figura 10, corresponden, en primer lugar, a la muestra *Arcilla-1* (48,5 Mpa); en segundo lugar, a la muestra *Arcilla-3* (48,2 Mpa), seguida por *Arcilla-2* (46,9 Mpa). Los resultados obtenidos están comprendidos dentro de las especificaciones de la norma UNE-EN 196-3: 2005 + A1:2009, que formula la validez de aquellos valores de resistencia normal que, para un período de 28 días, se ubiquen dentro del rango  $\geq 42,5$  -  $\leq 62,5$  Mpa, cuando se emplea un cemento de alta resistencia inicial (42,5 R). Al mismo tiempo, se deduce un detalle interesante cuando se comparan los valores de todas las probetas, incluyendo la de referencia, y que consiste en que todas las probetas elaboradas con arcillas sepiolíticas superan en resistencia a la muestras patrón.

Tabla 8: Resultados de los ensayos mecánicos a flexión y a compresión a partir de probetas elaboradas con arcillas sepiolíticas de Guinea Ecuatorial, para un período de curado de 28 días (UNE-EN 196-3: 2005 + A1:2009).

MUESTRA	RESISTENCIA A FLEXIÓN (Mpa)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Mpa)
<i>CemRef</i>	7,4	46,1
<i>Arcilla-1</i>	7,5	48,5
<i>Arcilla-2</i>	6,4	46,9
<i>Arcilla-3</i>	7,0	48,2

Lo expresado anteriormente, confirma y establece, evidentemente, la capacidad reactiva de las sepiolitas de Malabo. Los resultados que se reflejan en las tablas 4, 5 y 6, así como en la figura 7, son argumentos que afianzan este testimonio; de igual manera, los datos de la tabla 3 permiten comprender el carácter puzolánico de las sepiolitas, porque consignan que prácticamente el cien por cien de la sílice que compone dichas sepiolitas es reactiva.

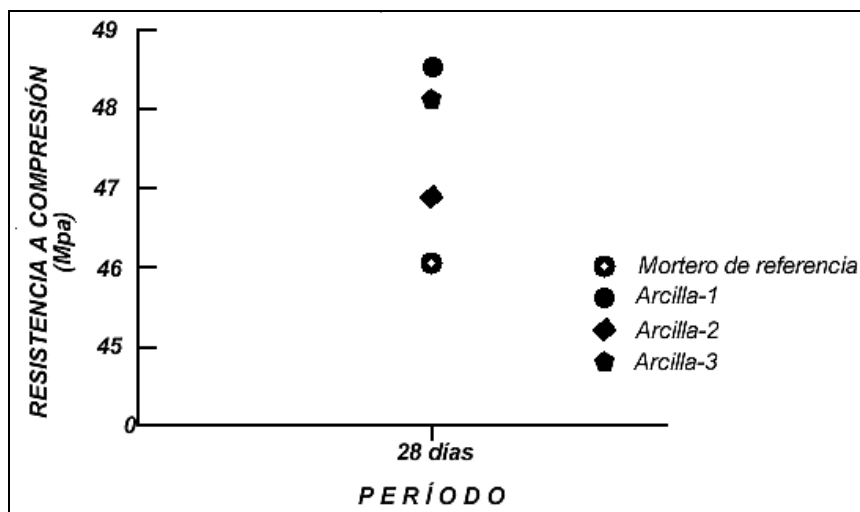


Figura 10: Representación gráfica de la evolución de las resistencias mecánicas a compresión de las probetas ensayadas a 28 días.

La actividad resistente, calculada individualmente para cada valor aportado por los ensayos mecánicos, generó valores positivos en todos los casos; por ejemplo: *Arcilla-1* (105,20 %), *Arcilla-2* (101,73%) y *Arcilla-3* (104,55%).

Los datos que se muestran en la tabla 9 han sido extraídos de los registros de pesaje de las probetas veinticuatro horas después del desmolde y veintiocho días después del curado normalizado en la cámara húmeda. Según estos resultados, las muestras *Arcilla-2* y *Arcilla-3* son menos densas y, por consiguiente, menos pesadas que la probeta patrón (*CemRef*). Entre las muestras de arcillas mencionadas es *Arcilla-3* la más densa.

Tabla 9: Registro del pesaje de las probetas de morteros para los períodos de 24 horas y 28 días de curado.

		<b>MUESTRAS</b>			
<b>PESO DE LAS PROBETAS (gramos)</b>	<i>A 24 horas de curado</i>	<i>CemRef</i>	<i>Arcilla-1</i>	<i>Arcilla-2</i>	<i>Arcilla-3</i>
		588,8	601,9	573,9	580,2
		591,2	601,9	572,4	579,4
		591,8	601,6	575,9	579,5
		<i>Media</i>	<i>Media</i>	<i>Media</i>	<i>Media</i>
		<b>590,6</b>	<b>601,8</b>	<b>574,06</b>	<b>579,7</b>
	<i>A 28 días de curado</i>	596,5	609,1	580,0	586,4
		596,1	608,9	578,6	586,3
		593,8	608,4	582,0	585,9
		<i>Media</i>	<i>Media</i>	<i>Media</i>	<i>Media</i>
		<b>595,5</b>	<b>608,8</b>	<b>580,2</b>	<b>586,2</b>

Sin embargo, es evidente que la muestra *Arcilla-1* es la más pesada, no sólo si se la compara con *Arcilla-2* y *Arcilla-3*, sino también con el propio mortero patrón. La razón de este comportamiento puede encontrarse en la alta capacidad de absorción de las sepiolitas; indudablemente, la muestra *Arcilla-1*, además de manifestar esta propiedad, es también la que posee la menor granulometría (ver figura 8), y, por consiguiente, la mayor superficie específica activa que la convierte en la más puzolánica. Es también la muestra que ha

aportado las mayores resistencias mecánicas normales a 28 días (ver tabla 8), así como los máximos valores del índice de actividad resistente.

De acuerdo con la experiencia, la cantidad de agua absorbida por los materiales puzolánicos se cede lentamente a la pasta, conforme la misma lo demande para completar las reacciones hidráulicas de los silicatos, esto puede implicar ciertas pérdidas de peso con el transcurso del tiempo que no alteran en modo alguno la coherencia del mortero (Costafreda, J.L., Calvo, B. y Parra y Alfaro, J.L., 2011).

Esta reflexión se asume en el presente trabajo como un criterio consistente para considerar a estas arcillas especiales como *áridos ligeros*.

## CONCLUSIONES

El análisis de la composición mineralógica de las muestras tomadas en la Isla de Bioko, Guinea Ecuatorial, determinó un alto porcentaje de sepiolita monomineral homogénea, con fases subordinadas de feldespato, hematita y caolinita. La sepiolita se presenta, por lo general, como un mineral de color blanco a gris claro, con hábitos fibrosos y aciculares, pero llega a formar masas irregulares compactas porosas que originan retículos y canales.

El estudio de la composición química reveló contenidos en  $\text{SiO}_2$  total entre el 27,55 % y el 28,30% en las tres muestras estudiadas. Los porcentajes de  $\text{SiO}_2$  capaz de reaccionar en mezclas hidráulicas varía entre 26,71% y 27,75%, por lo que prácticamente la masa total de la muestra es reactiva. Asimismo, los resultados obtenidos del cálculo de la relación  $\text{SiO}_2/(\text{CaO} + \text{MgO}) = 28,7\%$  (*Arcilla-1*), 27,14% (*Arcilla-2*) y 29,84% (*Arcilla-3*), indican que estos materiales cumplen con los requerimientos químicos ( $\geq 3,5\%$ ) de la norma UNE-EN 196-2:2006).

De acuerdo con el análisis de las variaciones experimentadas en la concentración de hidróxido de calcio respecto a la concentración de saturación, en disoluciones que contienen arcillas sepiolíticas (25%) mezcladas con cemento pórtland (75%), se determinó que las muestras analizadas poseen excelentes propiedades puzolánicas.

Las muestras estudiadas son de alta pureza, sin contenido en materia orgánica, y de granulometría fina; las fracciones se concentran mayormente en el *huso granulométrico* de 0,50 – 0,16 -0,80 mm.

Los morteros obtenidos mediante diseño de mezclas que contemplan la sustitución del cemento portland por arcilla sepiolíticas hasta en un 25% poseen una consistencia adecuada, son trabajables, y con un diámetro de escurrimiento de 180 mm, idóneos para su puesta en obra mediante bombeo.

Las probetas elaboradas según la dosificación: 75% *Cemento pórtland* + 25% *arcilla sepiolíticas* + *arena normalizada* + *agua destilada*, aportan resistencias mecánicas elevadas en un período de 28 días (46,9 – 48,5 *Mpa*), que superan el valor de la probeta patrón (46,1 *Mpa*) para la misma edad. Son igualmente elevados los valores obtenidos mediante el cálculo del índice de la actividad resistente (*entre 101.73 - 105,20 %*).

## **BIBLIOGRAFÍA**

**Costafreda, J.L.** (2008). Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid. 515 p.

**Costafreda, J.L., Calvo, B. y Parra y Alfaro, J.L.** (2011). Contribución de la zeolita natural a las resistencias mecánicas de cementos, morteros y hormigones. *IX Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción*. Quito, Ecuador. Págs. 10.

Norma **UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006**. Método del tamizado por vía seca.

Norma **UNE-EN 196-5: 2001**). Determinación de la puzolanicidad.

Norma **UNE-EN 1015-3**. Determinación de la consistencia del mortero fresco por el método de sacudida.

Norma **UNE-EN 196-2:2006 // UNE 80225:1993 EX // UNE EN 451-1:2006**. Análisis químico.